

DOI: 10.5846/stxb201405271089

罗旭, 贺红士, 梁宇, 吴志伟, 黄超, 张庆龙. 林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究. 生态学报, 2016, 36(4): - .
Luo X, He H S, Liang Y, Wu Z W, Huang C, Zhang Q L. Simulating the effects of fire disturbance for predicting aboveground biomass of major forest types in the Great Xing'an Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(4): - .

林火干扰对大兴安岭主要林分类型地上生物量预测的影响模拟研究

罗 旭¹, 贺红士^{2,*}, 梁 宇³, 吴志伟³, 黄 超³, 张庆龙³

1 宁波大学建筑工程与环境学院, 宁波 315211

2 东北师范大学地理科学学院, 长春 130024

3 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016

摘要: 林火干扰是北方森林最主要的自然干扰之一, 对北方森林地上生物量影响是一个长期的过程。因此, 在预测地上生物量动态变化时需要考虑林火的影响。本研究运用空间直观景观模型 LANDIS PRO, 模拟大兴安岭林区林火对不同树种地上生物量预测的影响。选取研究区 5 种主要树种林分(兴安落叶松、樟子松、云杉、白桦和山杨), 以无干扰情景为参考预案, 在验证模型模拟结果的基础上, 模拟林火在短期(0—50 年)、中期(50—150 年)和长期(150—300 年)对地上生物量的量化影响, 及其对不同立地类型地上生物量的动态变化。结果表明: (1) 基于森林调查数据参数化的 2000 年森林景观模拟结果能够较好地代表 2000 年真实森林景观, 模拟的 2010 年森林林分密度和胸高断面积与 2010 年森林调查数据无显著性差异 ($P>0.05$), 当前林火干扰机制模拟结果能够较好地与样地调查数据匹配, 说明林火模拟能够代表当前研究区林火发生情况; (2) 与无干扰预案相比, 整个模拟时期内景观水平上林火减少了 1.7—5.9 t/hm² 地上生物量; (3) 与无干扰预案相比, 林火预案下主要树种生物量在短期、中期和长期变化显著 ($P<0.05$); (4) 在不同模拟时期, 林火显著地改变了地上生物量空间分布, 其中以亚高山区地上生物量降低最为明显。本研究可为长期森林管理以及森林可持续发展提供参考。

关键词: 林火干扰; LANDIS; 北方森林; 林分密度; 胸高断面积; 地上生物量

Simulating the effects of fire disturbance for predicting aboveground biomass of major forest types in the Great Xing'an Mountains

LUO Xu¹, HE Hongshi^{2,*}, LIANG Yu³, WU Zhiwei³, HUANG Chao³, ZHANG Qinglong³

1 Faculty of Architectural, Civil Engineering and Environment, Ningbo University, Ningbo 315211, China

2 School of Geographical Science, Northeast Normal University, Changchun 130024, China

3 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Science, Shenyang 110016, China

Abstract: Boreal forest is an important component in the global carbon balance and has been a focus of study for a long time. In China, about 30% of forested areas are boreal forests, which play a key role in the country's carbon budget. Fire is a dominate forest landscape process in the boreal forests of northeastern China. Because of the stochastic nature of fire and forest succession, reliable prediction of aboveground forest biomass for boreal forests is challenging. Thus, predicting the dynamics of boreal forest biomass requires accounting for fire's effect. The effect of fire on the dynamic of forest aboveground biomass is a long-term process that occurs at various spatial and temporal scales. It would be difficult to capture the fire process with traditional field experiment research. In order to better understand the ecological processes related to fire, a

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41371199); 973 项目(2011CB403206); 森林与土壤生态国家重点实验室自主重大项目(LFSE2013-12)

收稿日期: 2014-05-27; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: heh@iae.ac.cn

spatially explicit forest landscape model based on our prior knowledge of biology, ecology, and computer science became a valuable tool for studying the forest structure and biomass prediction, at various spatial and temporal scales. Therefore, model simulation can help us to better understand the complex interactive effects of forest landscape processes and vegetation on forest biomass. In this study, we used a forest landscape model (LANDIS PRO) to investigate the effect of fire on landscape-level predictions of the tree component of biomass in a boreal forest landscape in the Great Xing'an Mountains. We first selected five major forest types (larch, *Larix gmelinii*; pine, *Pinus sylvestris* var. *mongolica*; spruce, *Picea koraiensis*; birch, *Betula platyphylla*; and aspen, *Populus davidiana*) in our study area, and treated the succession-only scenario as the reference scenario. We then calibrated and validated the simulated results of the LANDIS PRO model. We predicted the tree biomass over three time intervals (0—50 years, 50—150 years, and 150—300 years), and quantified the effect of fire on predictions of total biomass and spatial distribution over short-, mid-, and long-term intervals. The simulation results showed that the initialized forest landscape constructed from the forest inventory data from the year 2000 adequately represented the forest composition and structure of that year. The simulated density and basal area of the year 2010 adequately represented the forest inventory data of that year at the landscape scale. Compared to the succession-only scenario, the predicted biomass decreased by 1.7—5.9 t/hm² in fire-only scenarios across all simulation periods. Compared to the succession-only scenario, the effect of fire on aboveground biomass differed significantly among the three intervals (short-, medium-, and long-term) ($P < 0.05$). Under the succession-only and fire scenarios, the spatial distribution of biomass differed significantly ($P < 0.05$) among simulation periods. The evidence from our study indicates that fire strongly influences the spatial distribution of forest biomass and that the fire scenario reduced more biomass in subalpine land types than in others. These results have significant implications for forest managers interested in designing management systems for long-term forest sustainability.

Key Words: fire disturbance; LANDIS; boreal forest; stand density; basal area; aboveground biomass

北方森林在全球碳平衡中是不可或缺的组成部分,一直以来备受学者们的关注^[1-3]。我国北方森林面积占全国森林面积的 30%,其生物量占全国森林生物量三分之一以上^[4]。因此,北方森林在碳收支方面起重要作用^[5-6]。在我国北方森林,林火向大气释放大量碳,影响了北方森林碳库和碳循环,一定程度上加剧了气候变暖^[7]。林火频发严重干扰自然生态系统,改变森林的年龄结构、树种组成、森林更新等,减少森林生物量^[8-10]。因此,在预测森林地上生物量时,需要考虑林火的作用以减小预测的不确定性^[11-12]。

当前许多研究考虑了林火对森林地上生物量的影响^[13-14],如胡海清等根据 2001—2010 年森林火灾资料以及野外调查和采样,估算了大兴安岭 2001—2010 年森林火灾所排放的总碳和含碳气体排放量^[15]。Wang 等基于样地调查的数据,研究林火对我国大兴安岭塔河林业局林 3 种落叶松林碳分配和初级生产力的影响^[16]。通过以上研究人们进一步了解林火对地上生物量的影响,但上述研究基本上局限于样地水平,在已有历史林火数据基础上,估算当前或者历史时期林火对地上生物量的影响,缺乏进行长时间大范围地预测林火对森林地上生物量的影响,特别是不同树种生物量对林火干扰的长期响应以及地上生物量空间分布变化研究。林火干扰是大时空尺度上的森林景观过程,其对森林景观的影响是长期的、大范围的、且有滞后效应,难以用传统的野外调查与观测方法来研究^[17-18]。为了更好的研究林火干扰对地上生物量的影响,应用森林空间直观景观模型,将立地尺度的研究结果运用到大尺度的森林景观变化研究中,成为研究大时空尺度森林结构和生物量估算及预测的有效工具^[19-20]。森林景观模型具有明显的优势,其可根据我们的需要控制和改变一些重要的参数和变量,实现不同预案多次重复模拟,达到景观水平上实施控制实验的目的^[21]。模拟结果可为管理者们提供管理措施中出现问题的解决方案,帮助我们深入理解林火在森林固碳过程中的复杂作用^[22-24]。近期研究表明,北方森林林火对森林生物量的影响超过气候变化的影响^[17, 25]。因此,预测林火对北方森林生物量预测的影响,确定区域尺度森林生物量和碳收支,为北方森林生态系统的结构和功能提供量化

指标,为森林碳汇和碳平衡提供理论依据^[26-27]。

本研究区隶属大兴安岭北方森林,林火干扰是区内最重要的自然干扰因素。大兴安岭森林林火发生频繁,是我国森林火灾高发区,年均森林过火面积居全国首位。研究林火对森林碳储量预测影响,为定量研究区森林碳储量及其动态,以及为应对气候变暖和林火管理策略制定提供依据。本文应用空间直观景观模型(LANDIS PRO),模拟林火对大兴安岭北部森林地上生物量动态变化的影响。首先,根据森林调查数据,对模型进行校验,再进行林火模拟结果验证。其次,在景观尺度上探讨林火对不同树种地上生物量在短期、中期、长期的影响,及其对地上生物量空间分布变化的影响。通过本研究可以提高北方森林地上生物量的预测精度,为未来森林经营管理提供参考,为大兴安岭地区碳循环研究提供科学依据。

1 研究区概况

本研究区位于黑龙江省北部,是大兴安岭林区的一部分。包括呼中、塔河和新林等三个林业局,总面积近 $2.8 \times 10^6 \text{ hm}^2$,全境南北长 235 km,东西宽 200 km(图 1)。研究区处于高纬度地区,属寒温带大陆性季风气候,较为寒冷。年平均气温为 $-2.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右,一月份平均气温为 $-27.8 \text{ }^\circ\text{C}$,七月平均气温为 $18 \text{ }^\circ\text{C}$ 。该区地形由西南向东北降低,地势平缓,坡度较小(一般小于 15°),平均海拔 550 m。年平均降水量为 428 mm,主要集中在六月至九月。该区的森林是典型的寒温带针叶林,属于泛北极植物区东西伯利亚植物区系,以西伯利亚植物区系为主,含有少量东北植物区系和蒙古植物区系成分。主要针叶树种有兴安落叶松(*Larix gmelinii*),樟子松(*Pinus sylvestris* var. *mongolica*)和云杉(*Picea koraiensis*)。主要阔叶树种有白桦(*Betula platyphylla*)和山杨(*Populus davidiana*)。另外,还分布有少量黑桦(*Betula dahurica*)、甜杨(*Populus suaveolens*)、柞树(*Quercus mongolica*)等。该区土壤以棕色针叶林土为主,分布较为广泛,其次还有草甸土、沼泽土、河滩森林土以及石质土等。

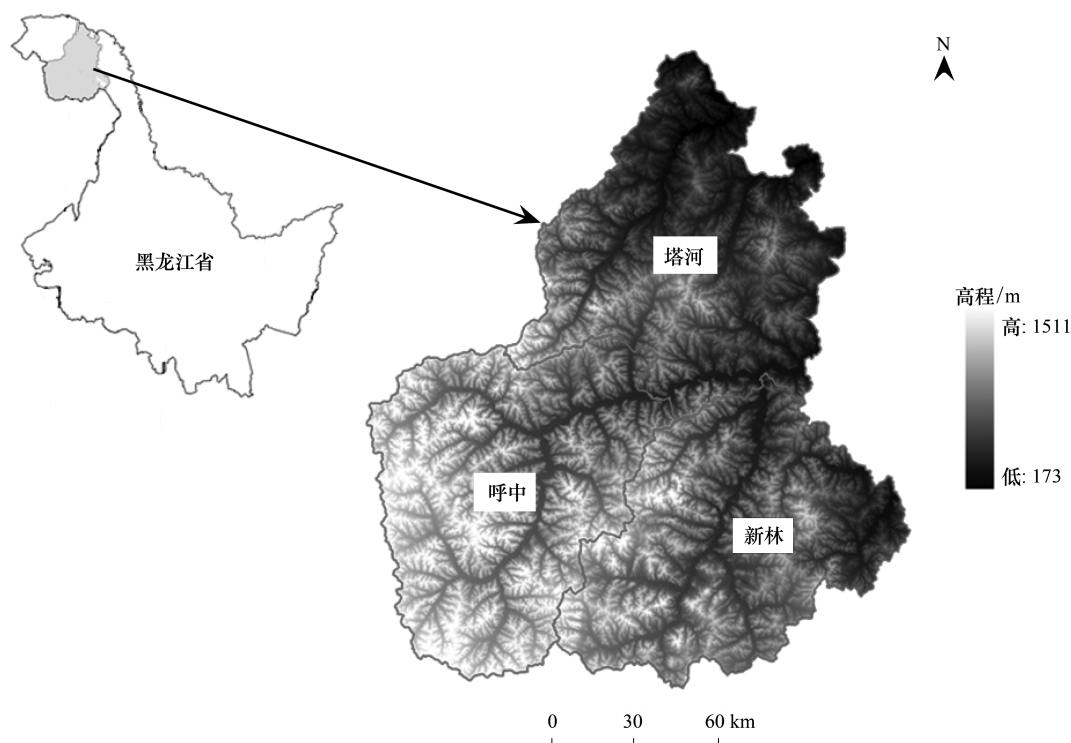


图 1 研究区地形位置图

Fig. 1 The geographic location and elevation of the study area

2 研究方法

2.1 LANDIS 模型

本文采用 LANDIS PRO (v. 7.0, <http://landis.missouri.edu>) 模型模拟由于演替以及林火干扰而产生的森林变化。LANDIS PRO 主要是用于模拟大时空尺度上 (10^3 — 10^8 hm^2 , 10^1 — 10^3 years) 森林演替动态变化、种子扩散、风倒、林火、生物干扰、采伐和可燃物处理等的空间直观景观模型^[28]。在模型中,景观被看成是一系列象元组合,在每一个象元中都记录着植被属性信息。与早期 LANDIS 版本不同, LANDIS PRO 模拟多个尺度的景观过程,记录每一个栅格上各个龄级的树种株数,整合每一个象元上林分密度、胸高断面积信息以及立地尺度过程模拟。基于林分信息,模型借助于自定义树种异速生长方程估算地上生物量。LANDIS 模型能够直接使用森林调查数据进行模型初始化、校正和验证工作。

演替是非空间立地尺度,由具体物种生活史属性诸如树种寿命、成熟年龄、耐阴性、耐火性等驱动的竞争过程。与以往模型版本不同,演替模块追踪每一个象元上树种的具体龄级和树种株数,这使得通过树种林分密度决定生长空间和控制建群以及自稀疏成为可能,同时增强了模拟演替变化的真实性。林火模块中对一场林火的模拟主要涉及三个方面:林火发生、林火蔓延和林火效果。在参数化林火参数的基础上,林火发生模拟主要是模拟在具体的时间和地点有多少场林火发生^[29];林火蔓延模拟主要是模拟从着火点出发,林火怎样蔓延至景观上其他地方^[30];林火效果模拟则是模拟林火发生象元上哪种龄级上哪些树种会被烧死^[31]。

近年来, LANDIS 模型广泛运用于全球北方森林研究。我国学者在大、小兴安岭以及长白山地区做了大量的研究工作。如王绪高等采用 LANDIS 模型模拟大兴安岭地区特大火灾后不同管理措施对落叶松更新的长期影响^[32]。贺红土等基于该模型研究了长白山保护区不同海拔带树种对气候变暖的响应^[33]。研究结果表明, LANDIS 模型能够很好地运用于中国北方森林研究。

2.2 LANDIS 模型参数化

LANDIS 输入参数主要包括 2 类:基本属性参数和 GIS 图件参数。本文主要模拟研究区 5 种主要树种的生物量变化,具体生活史属性参见表 1。

表 1 研究区主要树种生活史属性
Table 1 Species life history attributes for the study area

主要树种 Major species	寿命 Longevity/ (years)	成熟年龄 Maturity age/ (years)	耐阴性 Shade tolerance	耐火性 Fire tolerance	最大传播距离 Maximum seeding distance/ (m)	最大平均 胸径 Maximum mean diameter/ (cm)	最大林分密度 Maximum stand density/ (trees/ hm^2)	潜在种子 萌发数 Potential germination seeds
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	300	20	2	4	150	55	600	10
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i>	250	40	2	3	200	60	560	20
云杉 <i>Picea koraiensis</i>	300	30	4	1	150	60	520	10
白桦 <i>Betula platyphylla</i>	150	15	1	3	2000	30	690	30
山杨 <i>Populus davidiana</i>	120	10	1	2	2000	50	680	30

2.2.1 树种组成图

树种组成图是 LANDIS 模型基本的 GIS 输入图件,其在景观上的每一个象元中都包括树种株数和年龄信息。本文构建的树种组成图主要是基于林相图数据和森林调查数据。林相图是基本的 GIS 图层(包含 113, 778 个小斑,平均斑块大小为 23 hm^2),其提供每一个小斑的具体地理边界和树种组成信息。森林调查数据(二类和三类森林调查数据:二类森林调查数据主要获取于 2010 年(172 个调查样点),三类森林调查数据(2001 个调查样点)主要获取于 2000 年和 2010 年)主要包括 2000 年和 2010 年前后不同径级的树种株数信息(根据相关径级和年龄关系,将上述调查数据转换成林相图中不同年龄级树种株数信息)。将林相图数据(面数据)和森林调查数据(点数据)相融合,生成初始的 2000 年树种组成图(栅格数据)。为了保证模拟精度

和减少计算负荷,将研究区所有 GIS 图件重采样为 90 m × 90 m 分辨率,得到 2217 行× 2609 列 GIS 输入图件。

2.2.2 立地类型图

基于研究区气候、地形和土壤等信息, LANDIS 模型将异质性景观划分为相对均质的立地类型单元。模型假定在每一个相对均质的立地单元中,同一树种具有相对一致的树种建群概率(SEP, Species Establishment Probability)。SEP 数值越高说明该树种在某一立地单元上具有更高的建群概率。本研究中的 SEP 主要是从前人研究中获得^[25, 34]。本研究划分了 6 种立地类型:非林地、阶地、阳坡、阴坡、亚高山和水域(表 2)。通过 Landsat TM 遥感影像解译获取非林地和水域信息。阶地、阴坡、阳坡和亚高山(海拔大于 800 m)等立地类型从数字高程(DEM)中提取。

2.2.3 林火干扰机制

本研究区林火频繁,是影响生物量预测最主要的自然干扰。1965—2010 年大兴安岭森林资源调查数据和森林火灾统计资料表明,46 年间大兴安岭共发生火灾 1614 次,森林总过火面积达 $3.5\times10^6\text{ hm}^2$ ^[35]。由于该区风倒和病虫害干扰较少,以及大兴安岭地区自 1999 年以来实施的“天然林保护工程”很大程度降低了采伐干扰强度,所以本文只模拟林火干扰对地上生物量的影响。本研究中假定每一个立地单元具有相对一致的林火干扰机制。通过林火点燃密度(每十年每公顷火点燃次数)和火烧轮回期(某地区森林完全火烧一遍所需要的时间)来定义不同的林火干扰机制单元。从研究区 1965—2005 年历史火烧记录数据计算获得不同立地类型上林火干扰参数(表 2)。具体林火模块参数见 LNADIS PRO 模型用户手册。

表 2 研究区林火情景参数和不同立地类型树种建群系数
Table 2 Parameters for the fire scenario and SEPs by species for each landtype

立地类型 Land type	平均火烧 轮回期 Mean fire return interval/ (year)	火点燃 密度 Fire ignition density	平均火烧 面积 Mean fire size/ (hm ²)	最大相对 密度 Maximum relative density	树种建群概率 Species establishment probabilities (SEP)				
					落叶松 Larch	樟子松 Pine	云杉 Spruce	白桦 Birch	山杨 Aspen
非林地 Non-forest	1500	0.0002	0	0.65	0	0	0	0	0
阶地 Terrace	500	0.0018	90	0.75	0.2	0.05	0.05	0.03	0.07
阳坡 Southern slope	150	0.0033	200	0.75	0.35	0.35	0.005	0.35	0.03
阴坡 Northern slope	160	0.0029	210	0.75	0.4	0.01	0.03	0.15	0.005
亚高山 Subalpine	140	0.0081	238	0.6	0.2	0.01	0	0.07	0.02
水域 Water	0	0	0	0.75	0	0	0	0	0

2.3 模拟预案与数据分析

为了模拟林火干扰对大兴安岭地上生物量的影响,本文设计了 2 个模拟预案:(1)只开启演替模块,将无干扰情景模拟结果作为参考预案;(2)同时开启演替和林火模块,模拟林火情景下不同树种地上生物量的动态变化。以参数化的 2000 年初始景观开始,模拟 300 年(2000—2300 年),选择不同的随机种子数,模拟 5 次,减少模型模拟误差。基于专门模型统计软件 LandStat70 统计结果,比较两种预案下各树种地上生物量的差异。为了比较林火对森林地上生物量随时间变化的影响,以无干扰情景作为参考预案,采用单因素方差分析方法(ANOVA),将模拟时间划分为短期(0—50 年)、中期(50—150 年)和长期(150—300 年),比较各树种在 3 个时期生物量变化的显著性差异。在统计不同树种地上生物量空间分布的基础上,比较树种生物量的显著性差异。本文只统计阳坡、阴坡、阶地和亚高山四种立地类型(生态区),因为该四类立地类型占研究区总面积的 90%以上。

2.4 模型验证

基于数据分割方法^[36],首先使用 70%的森林调查数据初始化 2000 年森林景观。在初始化过程中,调整模拟树种生长曲线,直到初始的森林景观与 70%的森林调查数据相吻合。其次,使用余下的 30%的森林调查

数据来验证初始化的景观。同理,在数据分割方法的基础上,使用初始化 2000 年森林景观作为模拟起始点,模拟无干扰情景至 2010 年。调整潜在种子萌发数,直到模拟的 2010 年森林景观与 2010 年森林调查数据吻合。

首先模拟林火预案至 2300 年。在输出结果中,我们随机选择 40 场低强度林火(25 年内没有再次发生林火),统计其火后 5 年、10 年、15 年、20 年和 25 年的株数和胸高断面积信息。其次,我们在野外调查了 40 场低强度林火(依据林火对森林生态系统的影响/破坏程度判断低强度林火,且过火面积小于 500 hm²),分别为林火发生 5 年、10 年、15 年、20 年和 25 年后火烧迹地(主要火烧时期为 1985s、1990s、1995s、2000s 和 2005s,火烧迹地分布于呼中、塔河和新林三个林业局境内。每个年龄级选取 8 个火烧迹地,每个火烧迹地选取 5 个 20 m × 20 m 的样方),记录样方内树种株数和 DBH(Diameter at Breast Height, 胸径大于 1 cm 植株)信息。统计火后各阶段所有火烧迹地上的林分密度和胸高断面积,以比较模拟结果和野外调查数据。

3 结果分析

3.1 模拟结果验证

从验证结果来看,2000 年参数化的林分密度和胸高断面积与 2000 年的森林调查数据较为吻合(卡方检验,林分密度: $\chi^2=2.894$, $df=4$, $P=0.576$;胸高断面积: $\chi^2=0.259$, $df=4$, $P=0.992$)。从检验结果看出,在景观水平上 2000 年的模拟结果和森林调查数据之间差异不显著($P>0.05$)。同样,模拟的 2010 年的森林景观(林分密度和胸高断面积)和基于森林调查数据计算的林分密度和胸高断面积在景观水平上基本一致(卡方检验,林分密度: $\chi^2=3.815$, $df=4$, $P=0.432$;胸高断面积: $\chi^2=0.398$, $df=4$, $P=0.983$)。模拟值和观测值之间差异不显著($P>0.05$)(图 2)。

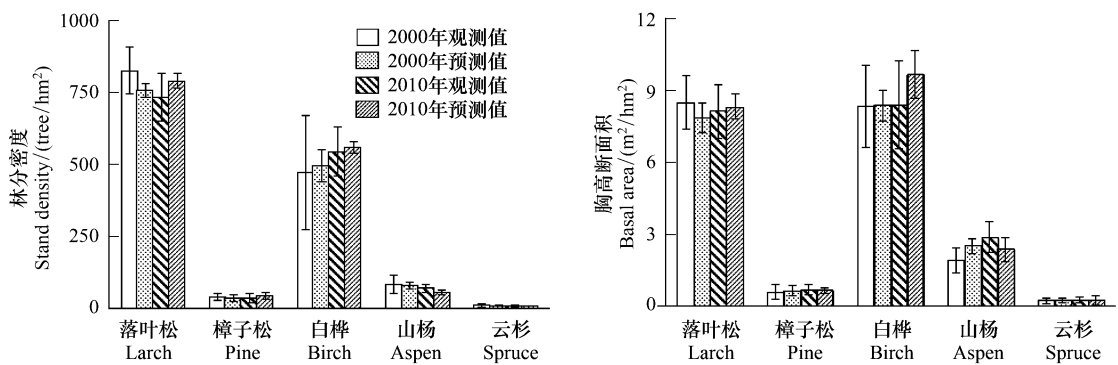


图 2 景观水平上 2000 年与 2010 年不同树种林分密度和胸高断面积观测值与预测值比较

Fig. 2 Landscape-scale stand density by species (a), and basal area by species (b) for the inventory data and predictions at years 2000 and 2010

当前林火干扰机制模拟结果表明,不同火后阶段树种演替模拟值(林分密度和胸高断面积)在观测值变化范围内(图 3)。从总体趋势可以得出,在火后 10 年内,林分密度增加迅速,但峰值后其表现为持续降低(图 3a)。因为在林火干扰后出现大面积的占用生长空间,先锋树种(主要是白桦和山杨)大量占据这些生长空间,生长到一定时期后达到较大林分密度,然后由于群落竞争导致自稀疏,使得林分密度表现为降低趋势。与林分密度变化趋势不同,25 年内景观水平上火后演替胸高断面积则表现为增加趋势(图 3b)。

3.2 林火对树种生物量的影响

在无干扰模拟预案下,针叶树种(落叶松、樟子松、云杉)地上生物量都不同程度的增加,但阔叶树种(白桦、山杨)表现为先增加后降低趋势(图 4a)。模拟的落叶松地上生物量在 180 年内从初始化的 26 t/hm²增加到 60 t/hm²,而 180 年后其地上生物量逐渐降低并趋于平稳。在无干扰预案下,樟子松和云杉地上生物量都

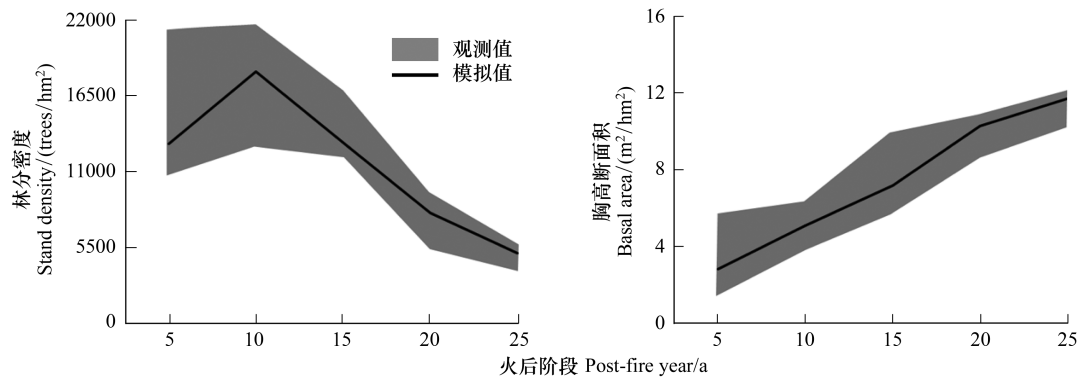


图3 不同火后阶段林分密度和胸高断面积的预测值与观测值变化比较

Fig. 3 Changes in predicted and observed stand density (a) and basal area (b) in burned areas in relation to post-fire year

随模拟进行不断的增加趋势。白桦和山杨地上生物量在模拟时期内不断波动。但总体趋势表现为,在模拟的前 60 年生物量逐渐增加,其后地上生物量降低趋势明显。在景观水平上,模拟结果表明,总体生物量在前 60 年内从 70 t/hm^2 增加到 92 t/hm^2 ,但在模拟 100 年后生物量从 92 t/hm^2 降低到 75 t/hm^2 (图 4a)。

在林火模拟预案中,落叶松地上生物量在整个模拟期间逐渐降低(图 4b)。在林火干扰下,模拟的樟子松和云杉地上生物量表现为增加趋势,但增加幅度比无干扰预案下小。在模拟的前 80 年,林火降低了山杨的生物量,但是在 80—300 年之间,林火增加了山杨的地上生物量。白桦地上生物量在林火作用下显著增加,因为林火干扰释放生长空间供先锋树种白桦定植。林火干扰后,白桦生物量显著增加而山杨生物量增加较少,这是由于山杨在研究区分布范围小,耐火性较白桦低,林火干扰后,山杨快速定植不易,且山杨定植对地形要求较白桦苛刻,故表现为两者生物量变化趋势差异明显。但在景观水平上(整个模拟期间),林火使总体地上生物量降低了 $1.7\text{—}5.9 \text{ t/hm}^2$ (图 4b)。

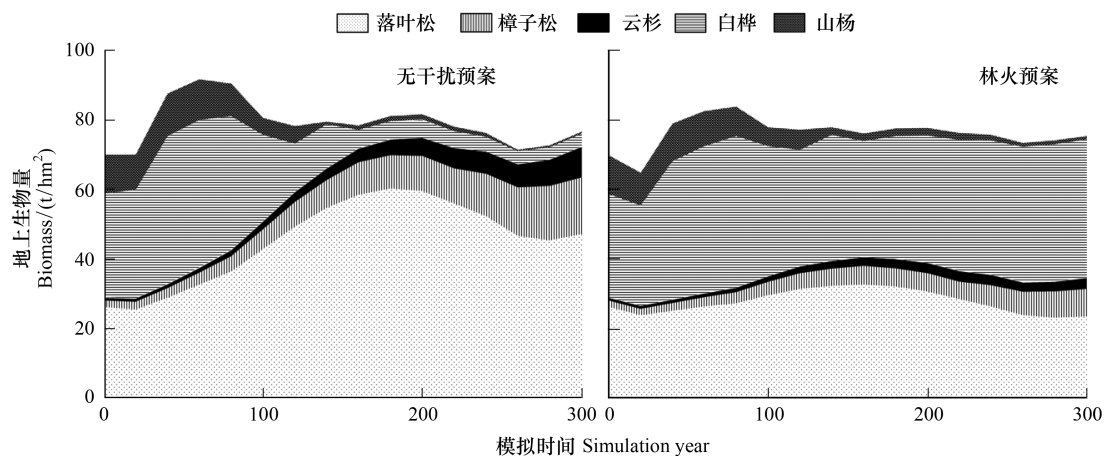


图4 景观水平上林火和无干扰预案下不同树种地上生物量动态变化

Fig. 4 Change in biomass density at the landscape level in relation to simulation year (by species for no disturbance and fire scenarios)

3.3 林火对不同时期地上生物量的影响

模拟结果表明,林火对树种地上生物量在短期、中期和长期内影响显著(图 5, $P < 0.05$)。林火不仅对各树种地上生物量影响显著,且在不同模拟时期表现亦不同。在无干扰预案下,模拟的落叶松、樟子松和云杉在短期、中期和长期 3 个阶段表现为不同程度增加,而白桦和山杨地上生物量表现为降低趋势。在林火干扰预案下,除山杨树种地上生物量降低外,其他树种生物量都表现为增加趋势。

在 3 个模拟时期内,落叶松地上生物量(无干扰预案和林火预案比较)表现为显著性差异($P < 0.05$)

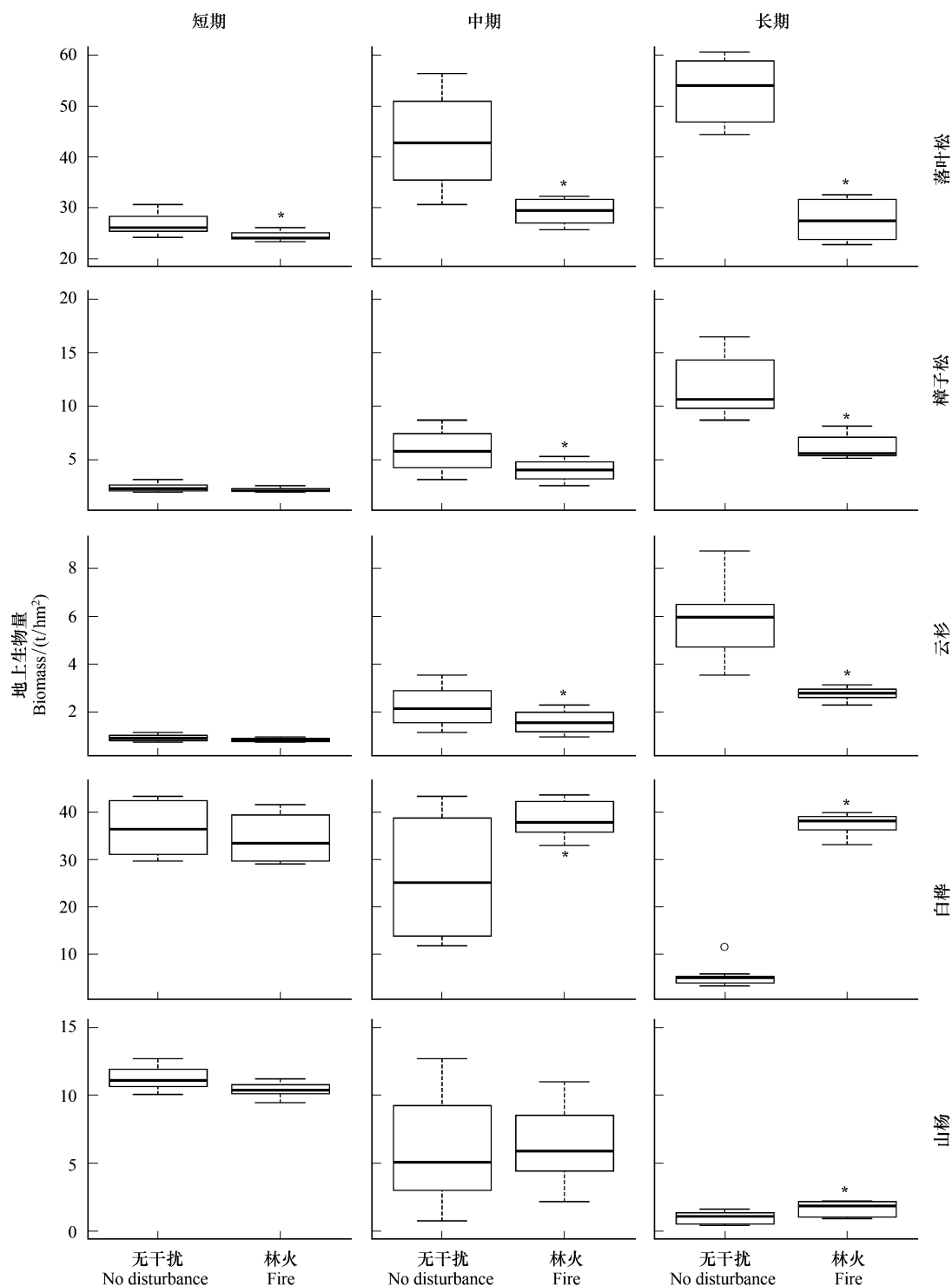


图 5 无干扰预案和林火预案下不同树种短期 (0—50 年)、中期 (50—150 年) 和长期 (150—300 年) 地上生物量变化比较

Fig. 5 Mean biomass density in relation to time interval for the two scenarios considered: no disturbance scenario, fire scenario. The time intervals are: 0—50 years for short term, 50—150 years for medium term, and 150—300 years for long term; * indicates that fire scenario differs significantly from no disturbance scenario ($P < 0.05$)

(* 表示 $P < 0.05$, 单位: t/hm²)

(图 5)。在无干扰情景下,落叶松生物量增加了 51%,但在林火情景下仅增加了 14%。从樟子松和云杉地上生物量模拟结果看,林火干扰在中期和长期表现为显著性差异,但在短期内没有显著性差异 ($P > 0.05$)。白桦

在不同模拟时期林火干扰差异明显(图 5)。在短期内,白桦树种的生物量较高。在无干扰预案下,白桦生物量 3 个时期内均明显下降。但在林火干扰预案下,其地上生物量则表现为增加趋势。在中期和长期内,林火对白桦地上生物量影响显著($P<0.05$)。对于山杨而言,在短期和中期内,林火对山杨地上生物量没有显著性差异($P>0.05$)。在长期内,林火对山杨生物量产生显著性影响。

3.4 林火对地上生物量空间变化的影响

模拟结果表明,在无干扰和林火预案下不同时期地上生物量在各个立地类型上差异显著(表 3, $P<0.05$)。模拟初始结果表明,地上生物量分布大小表现为:阳坡>阴坡>阶地>亚高山。与无干扰预案相比,林火在第 50 年、第 300 年显著降低了阶地类型地上生物量,但在第 150 年时林火影响不显著。在模拟 300 年内,林火预案和无干扰预案地上生物量差值随模拟时间的进行表现为不断减小趋势。在亚高山区,林火干扰降低地上生物量显著($P<0.05$)。在第 50 年时,林火预案与无干扰预案相比,生物量降低了近 11.2 t/hm^2 。总体而言,在 4 个立地类型上的第 50 年、150 年、300 年中,林火预案(与无干扰预案相比)显著地降低了森林地上生物量。与第 150 年和第 300 年相比,第 50 年林火降低地上生物量最为显著。

表 3 不同立地类型上无干扰和林火预案下平均地上生物量动态变化(单位: t/hm^2)
Table 3 Species biomass dynamics on different landtypes under two simulated scenarios

立地类型 Land type	无干扰预案 Succession scenario			林火干扰预案 Fire scenario		
	第 50 年 Year 50	第 150 年 Year 150	第 300 年 Year 300	第 50 年 Year 50	第 150 年 Year 150	第 300 年 Year 300
阶地 Terrace	73.21	66.11	69.74	71.47 *	66.41	68.42 *
阳坡 Southern slope	75.78	67.52	63.51	67.82 *	65.97 *	63.28 *
阴坡 Northern slope	74.84	67.54	63.48	66.86 *	65.75 *	62.29 *
亚高山 Subalpine	54.58	52.71	47.44	43.38 *	45.41 *	43.84 *

* 表示与无干扰预案相比, $\alpha = 0.05$ 显著性差异

4 结论与讨论

一直以来,许多以往的森林景观模型研究很少进行模型结果验证。因为验证所需要的独立时空数据比较难以获取^[37]。但验证模拟结果在量化森林景观模型的真实性和可信性的过程中非常重要^[24, 38]。过去关于森林景观模型结果的验证主要是将模型结果与其他模型结果相比较,或者定性地与生态学或者生物学规律相比较^[32, 39-41]。很少有研究是基于具体林分信息(林分密度和胸高断面面积)作验证的。本研究通过将模拟结果直接与森林调查数据做比较,同时直接将林火模拟效果与火烧迹地调查数据作比较,这在以往森林景观模型结果验证中很少涉及。结果表明,本研究模型模拟结果与森林调查数据吻合较好(图 2, 3),模型模拟结果能够很好地代表真实景观。

研究区总体生物量的变化趋势表现为,随着模拟的进行,景观水平地上生物量先增加后降低再保持稳定水平。该结果和许多模型模拟结果一致^[42-45]。这可能是由于早期受人为干扰的北方森林生态系统,树木处于中幼龄林阶段,其生物量生长较快,当树木处于老龄林阶段,树木生物量基本上生长缓慢。由模拟结果可知,在无干扰情景下,景观水平上针叶树种(落叶松、樟子松、云杉)地上生物量逐渐取代阔叶树种(白桦和山杨)地上生物量。这与许多前人研究结果一致^[46-47],落叶松、樟子松和云杉为该区的顶级演替树种。

在林火情景下,白桦生物量显著增加,且与无干扰情景差别明显,这种变化趋势主要与白桦具有强的种子扩散和定居能力等生物学特性有关。模型模拟的白桦生物量变化很好地说明了白桦是阳性树种,受林火的影响非常显著,是本区火后植被恢复的先锋树种^[32]。本文模拟结果表明,景观水平上林火干扰显著降低了地上生物量 $1.7\text{—}5.9 \text{ t/hm}^2$ 。有研究表明在俄罗斯西伯利亚中部的北方针叶林中低强度林火降低了 $(6.5\pm 2.1) \text{ t/hm}^2$ 地上生物量^[48],比我们的模拟结果高,这是由于本研究区长期实施灭火政策所致。

模拟结果表明,在不同模拟时期林火显著地影响了不同立地类型上地上生物量的空间分布。与其他立地

类型相比,林火在阶地类型上对生物量的影响最小,这可能是由于该立地类型上相对较低的火烧频率。随着演替的进行,林火对生物量的影响程度逐渐减弱。这是由于长时间的树木生长使得地上生物量都集中于年龄较老的树上,林火增加了落叶松的林分尺寸,而落叶松是本区耐火性能最强的树种^[49]。在亚高山区,林火对生物量影响最为明显,由于历史火烧统计数据显示在亚高山区受雷击火概率大^[47],火烧频率较高,且亚高山区主要林型为针叶林,较易引发林火。

本研究采用 LANDIS PRO 模型,基于林相图数据和森林调查数据,模拟林火干扰对大兴安岭地区地上生物量的量化影响。模拟结果表明:(1)在森林调查数据基础上参数化和验证的模型结果能够很好地代表真实景观,验证后的林火干扰模拟能够反映当前的林火干扰机制;(2)景观水平和树种水平地上生物量在整个模拟时期受林火干扰影响显著,林火不但对不同树种生物量影响显著,还在不同时期产生不同的影响效果;(3)随着模拟的进行,林火在短期、中期和长期内降低了兴安落叶松、樟子松和云杉的地上生物量,但在中期、长期内增加了白桦和山杨的地上生物量;(4)在不同模拟时期,林火显著地改变了不同立地类型上地上生物量的分布。本研究模型验证方法可为后续森林景观模型结果验证提供了参考。研究结果可为大兴安岭林区长期森林经营和森林碳库研究以及森林生物量预测提供借鉴和思路。

参考文献 (References):

- [1] Melillo J M, McGuire A D, Kicklighter D W, Moore B, Vorosmarty C J, Schloss A L. Global climate change and terrestrial net primary production. *Nature*, 1993, 363(6426): 234-240.
- [2] Gower S T, Krankina O, Olson R J, Apps M, Linder S, Wang C. Net primary production and carbon allocation patterns of boreal forest ecosystems. *Ecological Applications*, 2001, 11(5): 1395-1411.
- [3] Houghton R A. Aboveground forest biomass and the global carbon balance. *Global Change Biology*, 2005, 11(6): 945-958.
- [4] Fang J Y, Chen A P, Peng C H, Zhao S Q, Ci L J. Changes in forest biomass carbon storage in China between 1949 and 1998. *Science*, 2001, 292(5525): 2320-2322.
- [5] 周广胜,何奇瑾. 生态系统响应全球变化的陆地样带研究. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 563-572.
- [6] Piao S L, Fang J Y, Ciais P, Peylin P, Huang Y, Sitch S, Wang T. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China. *Nature*, 2009, 458(7241): 1009-1013.
- [7] 赵凤君,王明玉,舒立福,王春乙. 气候变化对林火动态的影响研究进展. *气候变化研究进展*, 2009, 5(1): 50-55.
- [8] Harvey B D, Leduc A, Gauthier S, Bergeron Y. Stand-landscape integration in natural disturbance-based management of the southern boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1/3): 369-385.
- [9] Gronewold C A, D'Amato A W, Palik B J. The influence of cutting cycle and stocking level on the structure and composition of managed old-growth northern hardwoods. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(6): 1151-1160.
- [10] Lei X D, Lu Y C, Peng C H, Zhang X P, Chang J, Hong L X. Growth and structure development of semi-natural larch-spruce-fir (*Larix olgensis*-*Picea jezoensis*-*Abies nephrolepis*) forests in northeast China: 12-year results after thinning. *Forest Ecology and Management*, 2007, 240(1/3): 165-177.
- [11] Leighty W W, Hamburg S P, Caouette J. Effects of management on carbon sequestration in forest biomass in Southeast Alaska. *Ecosystems*, 2006, 9(7): 1051-1065.
- [12] Eliasson P, Svensson M, Olsson M, Ågren G I. Forest carbon balances at the landscape scale investigated with the Q model and the CoupModel - Responses to intensified harvests. *Forest Ecology and Management*, 2013, 290: 67-78.
- [13] 孙龙,张瑶,国庆喜,胡海清. 1987 年大兴安岭林火碳释放及火后 NPP 恢复. *林业科学*, 2009, 45(12): 100-104.
- [14] 田晓瑞,殷丽,舒立福,王明玉. 2005—2007 年大兴安岭林火释放碳量. *应用生态学报*, 2009, 20(12): 2877-2883.
- [15] 胡海清,魏书精,孙龙. 大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算. *生态学报*, 2012, 32(17): 5373-5386.
- [16] Wang C K, Gower S T, Wang Y H, Zhao H X, Yan P, Bond-Lamberty B P. The influence of fire on carbon distribution and net primary production of boreal *Larix gmelinii* forests in north-eastern China. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 719-730.
- [17] Gustafson E J, Shvidenko A Z, Sturtevant B R, Scheller R M. Predicting global change effects on forest biomass and composition in south-central Siberia. *Ecological Applications*, 2010, 20(3): 700-715.
- [18] He H S, Mladenoff D J, Gustafson E J. Study of landscape change under forest harvesting and climate warming-induced fire disturbance. *Forest Ecology and Management*, 2002, 155(1): 257-270.
- [19] Xu C G, Güneralp B, Gertner G Z, Scheller R M. Elasticity and loop analyses: tools for understanding forest landscape response to climatic change in spatial dynamic models. *Landscape Ecology*, 2010, 25(6): 855-871.
- [20] 胡远满,徐崇刚,常禹,李秀珍,布仁仓,贺红土,冷文芳. 空间直观景观模型 LANDIS 在大兴安岭呼中林区的应用. *生态学报*, 2004, 24

- (9): 1846-1856.
- [21] Mladenoff D J. LANDIS and forest landscape models. *Ecological Modelling*, 2004, 180(1): 7-19.
- [22] Lenihan J M, Drapek R, Bachelet D, Neilson R P. Climate change effects on vegetation distribution, carbon, and fire in California. *Ecological Applications*, 2003, 13(6): 1667-1681.
- [23] Schumacher S, Bugmann H, Mladenoff D J. Improving the formulation of tree growth and succession in a spatially explicit landscape model. *Ecological Modelling*, 2004, 180(1): 175-194.
- [24] Shifley S R, Thompson III F R, Dijak W D, Fan Z F. Forecasting landscape-scale, cumulative effects of forest management on vegetation and wildlife habitat: a case study of issues, limitations, and opportunities. *Forest Ecology and Management*, 2008, 254(3): 474-483.
- [25] Li X, He H S, Wu Z, Liang Y, Schneiderman J E. Comparing Effects of Climate Warming, Fire, and Timber Harvesting on a Boreal Forest Landscape in Northeastern China. *PloS One*, 2013, 8(4): e59747.
- [26] 刘斌, 田晓瑞. 大兴安岭呼中森林大火碳释放估算. *林业资源管理*, 2011, 6(3): 47-51.
- [27] 赵敏, 周广胜. 中国森林生态系统的植物碳贮量及其影响因子分析. *地理科学*, 2004, 24(1): 50-54.
- [28] Wang W J, He H S, Spetich M A, Shifley S R, Thompson F R, Larsen D R, Fraser J S, Yang J. A large-scale forest landscape model incorporating multi-scale processes and utilizing forest inventory data. *Ecosphere*, 2013, 4(9): art106.
- [29] Yang J, He H S, Gustafson E J. A hierarchical fire frequency model to simulate temporal patterns of fire regimes in LANDIS. *Ecological Modelling*, 2004, 180(1): 119-133.
- [30] Yang J, He H S, Shifley S R. Spatial controls of occurrence and spread of wildfires in the Missouri Ozark Highlands. *Ecological Applications*, 2008, 18(5): 1212-1225.
- [31] He H S, Mladenoff D J. Spatially explicit and stochastic simulation of forest-landscape fire disturbance and succession. *Ecology*, 1999, 80(1): 81-99.
- [32] 王绪高, 李秀珍, 贺红士, 解伏菊. 1987 年特大火灾后不同树种种植比例对大兴安岭森林景观的长期影响. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 855-861.
- [33] He H S, Hao Z Q, Mladenoff D J, Shao G F, Hu Y M, Chang Y. Simulating forest ecosystem response to climate warming incorporating spatial effects in north-eastern China. *Journal of Biogeography*, 2005, 32(12): 2043-2056.
- [34] Liu Z H, He H S, Yang J. Emulating natural fire effects using harvesting in an eastern boreal forest landscape of northeast China. *Journal of Vegetation Science*, 2012, 23(4): 782-795.
- [35] 胡海清, 魏书精, 孙龙. 1965—2010 年大兴安岭森林火灾碳排放的估算研究. *植物生态学报*, 2012, 36(7): 629-644.
- [36] Araújo M B, Pearson R G, Thuiller W, Erhard M. Validation of species-climate impact models under climate change. *Global Change Biology*, 2005, 11(9): 1504-1513.
- [37] Rykiel E J Jr. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling*, 1996, 90(3): 229-244.
- [38] Clark J S, Carpenter S R, Barber M, Collins S, Dobson A, Foley J A, Lodge D M, Pascual M, Pielke R Jr, Pizer W, Pringle C, Reid W V, Rose K A, Sala O, Schlesinger W H, Wall D H, Wear D. Ecological forecasts: an emerging imperative. *Science*, 2001, 293(5530): 657-660.
- [39] Chen X W. Modeling the effects of global climatic change at the ecotone of boreal larch forest and temperate forest in northeast China. *Climatic Change*, 2002, 55(1/2): 77-97.
- [40] Gustafson E J, Shifley S R, Mladenoff D J, Nimerfro K K, He H S. Spatial simulation of forest succession and timber harvesting using LANDIS. *Canadian Journal of Forest Research*, 2000, 30(1): 32-43.
- [41] Thompson J R, Foster D R, Scheller R, Kittredge D. The influence of land use and climate change on forest biomass and composition in Massachusetts, USA. *Ecological Applications*, 2011, 21(7): 2425-2444.
- [42] Gough C M, Vogel C S, Harrold K H, George K, Curtis P S. The legacy of harvest and fire on ecosystem carbon storage in a north temperate forest. *Global Change Biology*, 2007, 13(9): 1935-1949.
- [43] Law B E, Sun O J, Campbell J, Van Tuyl S, Thornton P E. Changes in carbon storage and fluxes in a chronosequence of ponderosa pine. *Global Change Biology*, 2003, 9(4): 510-524.
- [44] Bond-Lamberty B, Wang C K, Gower S T. Net primary production and net ecosystem production of a boreal black spruce wildfire chronosequence. *Global Change Biology*, 2004, 10(4): 473-487.
- [45] Harmon M E, Moreno A, Domingo J B. Effects of partial harvest on the carbon stores in Douglas-fir/western hemlock forests: a simulation study. *Ecosystems*, 2009, 12(5): 777-791.
- [46] 周以良. 中国大兴安岭植被. 北京: 科学出版社, 1991.
- [47] 徐化成. 中国大兴安岭森林. 北京: 科学出版社, 1998.
- [48] Ivanova G A, Conard S G, Kukavskaya E A, McRae D J. Fire impact on carbon storage in light conifer forests of the Lower Angara region, Siberia. *Environmental Research Letters*, 2011, 6(4): 045203.
- [49] Chang Y, He H S, Bishop I, Hu Y M, Bu R C, Xu C G, Li X Z. Long-term forest landscape responses to fire exclusion in the Great Xing'an Mountains, China. *International Journal of Wildland Fire*, 2007, 16(1): 34-44.